

Лекция 2. ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ. ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ

- 2.1 История развития дистанционных методов исследования
- 2.2. Роль экологического картографирования в науке и практике
- 2.3 Дистанционное зондирование
- 2.4 Картографирование загрязнения вод суши
- 2.5 Анализ эколого-геохимических карт

2.1 История развития дистанционных методов исследования

Аэрокосмические методы исследования Земли вносят все больший вклад в решение различных задач в области изучения и рационального использования природных ресурсов, охраны окружающей среды, лесного и сельского хозяйства, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Широкое применение аэрокосмических методов исследования Земли обусловлено рядом их уникальных особенностей: большой обзорностью, оперативностью получения информации, возможностью работы в любых труднодоступных районах, высокой достоверностью, широким спектром регистрируемых параметров, возможностью получения данных на различных масштабных уровнях и др. [материал предоставлен В. В. Замшиным, аспирантом МИИГАиК; 1, 2, 5, 14].

Аэрокосмические методы исследования Земли относятся к методам дистанционного зондирования (ДЗ). Такие методы предполагают получение данных на основании измерений, проведенных на расстоянии [1, 2, 10].

Настоящая статья посвящена истории возникновения и развития аэрокосмических методов исследования Земли. Она также частично охватывает вопросы возникновения и развития методов ДЗ в целом, поскольку именно они являются основой для аэрокосмических методов. Статья состоит из четырех частей, каждая из которых описывает один из периодов истории рассматриваемой тематики, условно выделенных автором.

В первой части представлена хронология основополагающих научных открытий, создавших предпосылки для возникновения ДЗ.

Во второй части описывается история развития аэросъемки с момента ее возникновения до момента запуска первого искусственного спутника Земли. Далее, в третьей части, приоритет отдается описанию развития космических методов исследования Земли как наиболее наукоемких и опирающихся на передовые технические достижения. В четвертой части дается краткий обзор современных представлений об аэрокосмических исследованиях Земли.

Статья носит обзорный характер, ориентирована прежде всего на описание истории научных открытий и изобретений, имеющих отношение непосредственно к аппаратуре и методам аэрокосмических исследований Земли, и в меньшей степени раскрывает развитие сопутствующих направлений

науки и техники, таких, как физика, химия, воздухоплавание, космонавтика, информатика и др. По мере приближения к настоящему времени развитие методов аэрокосмических исследований Земли становится настолько бурным и разносторонним, что в третьей и четвертой частях статьи, относящихся главным образом ко второй половине XX века, описание дается уже не в виде хронологии отдельных событий, а в виде обобщенного обзора.

Краткая хронология основополагающих научных открытий

В основе действия как устаревшего, так и современного оборудования ДЗ лежат фундаментальные физические принципы [1, 13]. Ниже приводится краткая хронология основополагающих научных открытий, которые обеспечили предпосылки для возникновения методов ДЗ и впоследствии аэрокосмических методов исследования Земли. Хронология построена на основе обзора американских исследователей из Университета Калифорнии (University of California) [17].

Наиболее сильные толчки к развитию методов и средств ДЗ давали научные открытия, связанные с изучением света (электромагнитных волн). Это объясняется тем, что даже и сейчас, несмотря на развитие гравиметрических, магнитометрических, акустических методов ДЗ, электромагнитные волны остаются основным агентом, обеспечивающим процесс дистанционного получения информации об объектах (суть ДЗ) [1, 2].

Развитие представлений древних людей о свете связано с легендой, рассказывающей об одном арабе, который проснулся однажды утром и увидел на стене своей палатки нечто необычное. После изучения увиденного он понял, что видит перевернутое изображение группы людей, стоящих на улице. Это произошло благодаря совпадению ряда факторов, в результате чего небольшое отверстие в противоположной стене палатки выступило в роли линзы.

Около 336–323 гг. до н. э. Аристотель достаточно подробно размышлял о природе света. Он отделял свет от вещества и отмечал, что некоторые объекты обладают прозрачностью, но это свойство имеет значение только в случае присутствия света. Такие представления уже могли допускать саму идею о физически обоснованном ДЗ.

Наиболее важным изобретением древних времен, которое формально можно считать первым средством ДЗ, является камера-обскура. Принцип действия камеры-обскуры впервые объяснил арабский физик и математик X в. Ибн ал-Хайсам (Альхазен). При этом он сделал важный вывод о том, что

общепринятая в то время теория распространения света (согласно которой лучи света исходят из глаз и как бы ощупывают объект) не соответствует действительности.

Изначально камера-обскура представляла собой комнату, полностью изолированную от света, за исключением небольшого отверстия в стене. Образы из внешнего мира, дома, деревья, люди и т. д., могли быть спроецированы в перевернутом виде на стене или экране, расположенном напротив отверстия. В XIII в. Роджер Бэкон привнес в науку принципы

использования камеры-обскуры для астрономических наблюдений, камера-обскура стала популярным инструментом для безопасного просмотра солнечного затмения.

В 1490 г. Леонардо да Винчи подробно описал действие камеры-обскуры.

С течением времени камера-обскура уменьшалась в размерах, пока не стала небольшим переносным устройством. Она оснащалась объективом и зеркалом, отражающим изображение в нужном направлении на экран для просмотра. Оснащенная таким образом камера помогала художникам в создании эскизов на месте. Принципиальным моментом в данном случае являлось то, что не было способа непосредственной записи изображения, это и сдерживало дальнейшее развитие методов ДЗ.

В 1614 г. Анджело Сала обнаружил, что соли серебра темнеют при воздействии солнечного света. Это открытие имеет принципиальное значение для последующего развития фотографии.

В 1666 г. Исаак Ньютон, экспериментировавший в то время с призмой, обнаружил, что с ее помощью свет может быть разложен на разноцветные составляющие. Используя вторую призму, он обнаружил, что образовавшиеся цвета можно повторно объединить в белый цвет. Возникает понятие о спектре. Отметим, что в настоящий момент мультиспектральные и гиперспектральные методы аэрокосмических исследований Земли являются наиболее эффективными [1, 2, 3].

В 1777 г. Карл Вильгельм Шееле обнаружил, что хромат серебра, темнеющий под воздействием солнечного света, может быть смыт аммиаком. При этом остаются темные неэкспонированные кристаллы хромата серебра, тем самым формируя «фиксированное» изображение, являющееся предшественником фотоматериалов. Здесь необходимо отметить, что впоследствии, с момента возникновения аэрофотосъемки и почти до конца XX столетия, фотоматериалы являлись основным носителем информации, получаемой при помощи аэрокосмических методов исследования Земли.

В 1800 г. Уильям Гершель показал наличие инфракрасного излучения (ИК), поместив термометр сразу за красной полосой видимого спектра, полученного при помощи призмы. На сегодняшний день аэрокосмические изображения, полученные в инфракрасной части спектра электромагнитных волн, являются одними из самых информативных для решения задач мониторинга растительных ресурсов [1, 2].

В 1802 г. Томас Юнг выдвинул основные положения концепции Юнга–Гельмгольца о теории цветного зрения на основе трех отдельных наборов колбочек в сетчатке глаза, «настроенных» на красный, синий и зеленый цвета.

В 1827 г. Жозеф Нисефор Ньепс отснял (сфотографировал, записал) первые картины из окна с видом на французскую деревню с помощью камеры-обскуры и асфальтового лака (битума), растворенного в животном масле. Этот раствор он наносил на пластину из стекла, меди или сплава олова со свинцом

и экспонировал ее в камере-обскуре несколько часов при ярком солнечном свете (получался так называемый гелиографический снимок). Это событие можно считать первым фактом автоматической записи информации в процессе ДЗ.

В 1839 г. Дагер и Ньепс представили общественности «дагерротипию» – изобретение, позволявшее выполнить съемку с получением одного позитивного изображения. В качестве фотоматериала использовали посеребренную медную пластинку, обработанную парами йода, в результате чего образовывался тончайший слой светочувствительного йодистого серебра.

Под действием света в этом слое возникало скрытое изображение, которое проявляли парами ртути и закрепляли раствором тиосульфата натрия.

В это же время Уильям Генри Фокс Тальбот изобрел новый способ фотографирования – с негативно-позитивным процессом. На светочувствительном материале (бумага, пропитанная нитратом серебра и раствором соли) получалось негативное изображение, с которого можно было получить неограниченное число позитивных копий.

В 1841 г. Тальбот зарегистрировал патент на негативно-позитивный способ создания фотоснимков. Для съемки он использовал йодосеребряную бумагу, проявлял ее с помощью нитрата серебра, фиксировал с помощью тиосульфата натрия. Получавшийся негатив он опускал в емкость с воском, который делал снимок прозрачным. После этого он накладывал прозрачный негатив на чистую йодосеребряную бумагу, экспонировал его и после проявления и фиксации получал позитивную копию [17].

Запатентованное изобретение Тальбота, по сути, является фотографическим процессом в его современном понимании. С точки зрения ДЗ это изобретение позволяло проводить автоматизированную запись информации об объектах, находящихся на расстоянии.

Дальнейшие исследования и разработки в этой области были направлены на улучшение технологических аспектов процесса фотографирования и его удешевление. Вскоре была увеличена чувствительность фотоматериалов (снижено время необходимого экспонирования). Особый вклад в решение этих задач внесли Ньепс де Сен-Виктор (родственник Джозефа Нисефора Ньепса) и Фредерик Скотт Арчер [17].

Несмотря на то, что к 1840-м гг. наука и техника позволяли производить запись полей электромагнитного излучения видимой части оптического диапазона спектра в виде фотографий, изучение природы механизма передачи этой информации было фактически на начальном уровне. Понятие электромагнитных волн только зарождалось. Одним из наиболее продуктивных ученых, работавших в этом направлении, был Джеймс Клерк Максвелл. В 1855 г. он разработал теорию цвета и количественный подход к рассмотрению зрительного цветового восприятия. Несколько позже он выпустил знаменитую работу «Динамическая теория поля», в которой им делаются важные обобщения и открытия, связанные с электромагнитным

полем. Однако значимость этой работы научная общественность того времени поняла не сразу [15, 17]. В современном контексте аэрокосмических исследований Земли уравнения Максвелла, описывающие электромагнитное поле, являются фундаментальными.

Возникновение и развитие аэросъемки Земли

Аэросъемка Земли предполагает ДЗ подстилающей поверхности, осуществляемое с воздушного носителя. В этом процессе могут быть выделены две технологические составляющие. Одна из них связана с обеспечением воздушного полета аппаратуры ДЗ, другая — с функционированием этой аппаратуры [1, 2, 10].

Воздухоплавание возникло в 1783 г., активно развивалось и продолжает развиваться в настоящее время. Родиной воздухоплавания, как и родиной фотографии, была Франция [12, 17, 18].

Как видно из предыдущей части статьи, первый в истории способ ДЗ с автоматической фиксацией результата (фотографирование) стал доступен в виде законченного технологического решения только через несколько десятилетий после возникновения воздухоплавания. Значит фактором, сдерживающим возникновение аэросъемки, было отсутствие аппаратуры ДЗ. В этой части статьи приводится краткая хронология основных событий, связанных с возникновением и развитием аэросъемки Земли (до момента возникновения космической съемки). Последовательность построена на основе обзора американских исследователей из Университета Калифорнии [17].

В 1858 г. Гаспер Феликс Турнашон (Надар) получает первый аэрофотоснимок Парижа с привязного аэростата с высоты более 350 м.

В 1861 г. фотограф Томас Саттон вместе с Джеймсом Кларком Максвеллом продемонстрировали методы получения цветного изображения с использованием красного, синего, зеленого и лимонного светофильтров.

В 1873 г. Герман Фогель обнаружил, что путем замачивания галогенидов серебра (чувствительных к синему свету) в различных красителях светочувствительность может быть смещена в сторону более длинных волн, что привело к открытию возможности получения снимков в ближней инфракрасной зоне электромагнитного спектра.

В 1887 г. в Германии начали эксперименты по аэрофотосъемке и фотограмметрической обработке съемочных материалов для измерения метрических характеристик участков лесов.

В 1889 г. Артур Батут сделал первый аэрофотоснимок с использованием воздушного змея.

В 1897 г. Альфредом Нобелем был получен первый аэрофотоснимок с использованием ракеты.

В 1899 г. Джордж Истман выпустил нитроцеллюлозную пленку, которая позволяла без потери качества снимков заменить стеклянные пластины, используемые в то время в качестве подложки для фотоматериалов. В этом же году была представлена первая камера фирмы Kodak.

В 1900 г. Макс Планк открыл кванты и дал математическое описание абсолютно черного тела, заложив основу для последующего развития квантовой механики.

В 1903 г. баварские военные использовали голубей для получения аэрофотоснимков, а Юлия Нейбронн запатентовала установку фотокамеры на груди у голубя Франциско с высоты около 600 м.

В 1907 г. Огюст и Луи Люмьер разработали простую систему цветной фотографии и реализовали ее в 35-миллиметровом стандарте.

В 1909 г. Уилбур Райт получил первые аэрофотоснимки с использованием самолета.

В 1915 г. лейтенантом-полковником Брабазоном в сотрудничестве с Thornton Pickard Ltd. были разработаны и изготовлены первые аэрофотоаппараты.

К 1918 г. французские военные в периоды интенсивной деятельности могли получать тысячи аэрофотоснимков в сутки. Во время Мез-Аргонского наступления в течение четырех дней было оперативно сделано 56 тыс. отпечатков аэрофотоснимков.

В 1919 г. началась канадская программа картирования лесов с использованием аэросъемки.

В 1920 г. появились первые книги по дешифрированию аэроснимков.

В 1924 г. Mannes и Godousky запатентовали многослойную фото пленку.

В 1931 г. капитан Альберт В. Стивенс развил инфракрасную чувствительность фото пленки.

В 1934 г. впервые вышел в свет журнал Photogrammetric Engineering (Техника фотограмметрии), основанный Американским обществом фотограмметрии. Этот журнал был позже назван Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (Техника фотограмметрии и дистанционное зондирование).

В 1936 г. Стивенс вместе с капитаном Андерсоном получил первые фотографии фактической кривизны Земли со свободно летящего воздушного шара с высоты 22 065 м.

В 1942 г. Kodak запатентовал первую псевдоцветную ИК-чувствительную пленку.

Вторая мировая война привела к резкому развитию аэрофотосъемки и методов интерпретации аэрофотоснимков. Германия впервые применила аэрофоторазведку для решения таких задач, как обнаружение и идентификация вражеской техники, оценка глубин для высадки морского десанта, оценка характеристик растительности и показателей проходимости территорий и др. До начала космических исследований Земли оставалось несколько лет [12, 17, 18].

Возникновение и развитие космической съемки Земли

Развитие космической съемки Земли тесно связано с развитием космонавтики. Возможность проведения съемки земной поверхности из космоса, в отличие от возможности проведения аэросъемки, сдерживалась не

отсутствием съемочного оборудования. Основной проблемой было само по себе достижение космического пространства. Эта проблема начала разрешаться в середине XX в., при этом необходимо отметить решающую роль великих русских ученых К. Э. Циолковского и С. П. Королева, разработавших основы теоретической и практической космонавтики соответственно [7, 16, 17, 18]. Из предыдущей части статьи видно, что ракеты использовались для дистанционных исследований земной поверхности и ранее, на этапе возникновения и развития аэросъемки, однако космоса они не достигали.

Развитие космической съемки Земли также тесно связано с изобретением и совершенствованием приемников излучения различного типа. Рассмотрение истории развития приемников излучения является отдельной объемной задачей. В этой статье мы только лишь кратко упомянем, что еще в 1911 г. берлинские ученые использовали фотодиоды для регистрации явления солнечного затмения, наблюдавшегося в Египте. Революционное изменение ситуации произошло с появлением твердотельных полупроводниковых приемников нового поколения. Квантовая эффективность современных полупроводниковых приемников излучения достигает 95–98%, т. е. регистрируется практически каждый фотон, попадающий на приемник. В конце 1950-х гг. были найдены и развиты технологии, которые обеспечивали низкую плотность дефектов и примесей в поверхностном слое полупроводника. Тем самым были заложены предпосылки для изобретения приборов с зарядовой связью (ПЗС). В конце 1960-х гг. были созданы первые ПЗС, в которых технология твердотельных приемников проявилась особенно успешно. Впервые устройство, способное сохранять и затем считывать электронные заряды, было разработано двумя сотрудниками известной телефонной корпорации Bell в конце 1960-х гг. В 1972 г. группа американских ученых из Лаборатории реактивного движения NASA основала программу развития приемников электромагнитного излучения для астрономии и космических исследований. Три года спустя совместно с учеными университета Аризоны эта команда получила первое ПЗС-изображение астрономического объекта – Урана [9].

Отдельно следует отметить, что возникновение и развитие космических методов исследования Земли, наряду с применением приемников излучения, неразрывно связаны с применением активных средств дистанционного зондирования, в первую очередь радиолокаторов. В 1954 г. в США был разработан первый радиолокатор бокового обзора, предназначенный для размещения на борту летательного аппарата [17].

Вернемся к описанию хронологии возникновения и развития космических исследований Земли.

До конца 1950-х гг. космическая съемка поверхности Земли осуществлялась с высот до 200 км исключительно с использованием аппаратуры, устанавливаемой на баллистических ракетах и зондах. Первый фотоснимок земной поверхности из космоса был получен при помощи фотоаппарата, установленного на баллистической ракете Фау-2 германского

производства, запущенной в 1945 г. с американского ракетного полигона White Sands. Ракета достигла высоты 120 км, после чего фотоаппарат с отснятой пленкой был возвращен на Землю в специальной капсуле [7, 18].

В 1954 г. совершил первый полет американский самолет-разведчик Локхид U-2, способный летать на высотах до 20 км. Полеты на такой высоте можно рассматривать как нечто промежуточное между космическими полетами и воздухоплаванием. Выполняя разведывательные задачи, U-2 демонстрировал высочайшую эффективность. Несколько лет он являлся неуязвимым для военных СССР. Перехват U-2 удался только в 1960 г.

4 октября 1957 г. в СССР был запущен «Спутник-1» — первый в мире искусственный спутник Земли (ИСЗ). США запустили свой первый спутник в январе 1958 г.

1 апреля 1960 г. был произведен запуск первого оперативного метеорологического спутника Tiros-1 (США). Это событие можно считать одним из наиболее знаковых в истории развития методов аэрокосмических исследований Земли. Tiros-1 исправно и систематически передавал информацию на Землю по радиоканалу. Аналогичным образом осуществляется передача информации со всех современных спутников.

В 1960-х гг. разведка США начала систематически получать фотографии с Земли с ИСЗ системы Corona.

12 апреля 1961 г. Ю. А. Гагарин стал первым человеком, совершившим космический полет. Вскоре после полета Ю. А. Гагарина в августе 1961 г., с борта корабля «Восток-2» летчик-космонавт СССР Г. С. Титов впервые выполнил «ручное» фотографирование Земли из космоса [11].

В 1964 г. в США было положено начало развертыванию системы метеорологических ИСЗ Nimbus.

25 июня 1966 г. в СССР был запущен первый оперативный метеорологический ИСЗ [7].

Остановимся несколько подробнее на начальных этапах отечественной истории космических исследований Земли.

В июне 1970 г. летчики-космонавты СССР А. Г. Николаев и В. И. Севастьянов выполнили космические фотосъемки Кавказа, Средней Азии, Каспийского моря, Западного Устья и других объектов с борта космического корабля «Союз-9». В период их полета впервые проведены подспутниковые эксперименты с целью отработки методики дешифрирования космических снимков. По снимкам с «Союз-9» были составлены космические фотокарты масштаба 1:1 000 000, проведено обновление основных элементов общегеографических карт Прикаспия и, в частности было установлено, что площадь водного зеркала залива Кара-Богаз-Гол за предшествующее десятилетие уменьшилась на 7 тыс. кв. км [11].

Орбитальная станция «Салют-1» (1971) была оснащена различной аппаратурой для фотографирования Земли, в том числе широкоформатной камерой с размерами кадрового окна 180x180 мм. Разномасштабные съемки, проведенные экипажем в составе Г. Г. Добровольского, В. Н. Волкова, В. И.

Пацаева, позволили сделать вывод о целесообразности использования для космических исследований Земли комплекса съемочных материалов с различными параметрами (масштаб, пространственное разрешение и др.), уточнить значение эффекта оптической генерализации для дешифрирования природных объектов различных размеров и спектральных характеристик. В дальнейшем программы полетов всех советских пилотируемых космических кораблей и орбитальных станций предусматривали производство съемок как в экспериментальных, так и в прикладных целях [11].

Важным этапом для космических исследований Земли и картографии стал полет корабля «Союз-12» (1973). На нем была впервые установлена специальная фотоаппаратура для многозональной съемки. Летчики-космонавты СССР В. Г. Лазарев и О. Г. Макаров выполнили значительный объем съемок в шести и девяти зонах спектра электромагнитных волн. Этим полетом была доказана эффективность космического многозонального зондирования в целях картографирования, геологических исследований, изучения растительности, почв, морских мелководий, дешифрирования природных образований по их спектральной отражательной способности. В результате дешифрирования многозональных снимков с «Союза-12» впервые осуществлено экспериментальное комплексное картографирование, обнаружены нефтегазоносные структуры, неизвестные ранее разломы земной коры, пустынные территории с неглубоко залегающими пресными грунтовыми водами [11].

Материалы таких съемок дали ощутимые народно-хозяйственные результаты. Например, по космическим изображениям, которые получены на «Салюте-3» (время работы станции – 1974–1975 гг.) П. Р. Поповичем и Ю. П. Артюхиным, определены в одном из районов страны 67 нефтегазоносных структур, в том числе подводных, ряд пересечений крупных разломов, перспективных для постановки разведочных работ на ценные полезные ископаемые [11].

На орбитальной станции «Салют-4» (1974–1977) находилось 12 фотографических систем различных типов — стационарных, переносных, многозональных, широкоформатных и малокадровых. Многозональная и разномасштабная съемка с «Салюта-4» покрыла около 4,5 млн кв. км юга нашей страны. На ее основе создан ряд региональных фотокарт, охватывающих Северный Прикаспий, Кыргызстан, Таджикистан, Крымский полуостров, Калмыкию и др. [Киенко, 1999].

Летчики-космонавты СССР Б. В. Волинов, В. М. Жолобов, В. В. Горбатко и Ю. Н. Глазков на орбитальной станции «Салют-5» (1976–1977), наряду со ставшей традиционной фотографической съемкой, выполняли комплексные визуальные наблюдения природных образований с применением оптических визирных устройств. Опыт показал, что визуальные наблюдения космонавтов за быстропротекающими природными процессами, стихийными явлениями в сочетании со съемкой дают ценный материал для контроля за состоянием окружающей среды [11].

Целевой полет для многозональной съемки земной поверхности был выполнен на космическом корабле «Союз-22» (1976). Экипаж в составе Б. Ф. Быковского и В. В. Аксенова доставил на Землю несколько тысяч изображений суши и водной поверхности в шести спектральных диапазонах. Для съемки использовался аппарат МКФ-6, разработанный совместно специалистами СССР и ГДР и изготовленный фирмой «Карл Цейсс Йена» [11].

На орбитальных станциях «Салют-6» (1977–1982) и «Салют-7» (1982–1991) успешно выполнены программы планомерных работ по дистанционному зондированию Земли. Эти программы составлялись по заказам многих отраслевых организаций. Они предусматривали выполнение съемок стационарными аппаратами КАТЭ-140, МКФ-6 и переносной фотоаппаратурой, а также производство значительного объема визуальных наблюдений [11].

С борта орбитальной станции «Салют-6» 11 и 26 сентября 1978 г. аппаратом КАТЭ-140 впервые выполнена конвергентная съемка — фотографирование заданной территории с разных точек орбиты. Этот эксперимент поставлен с целью определения возможностей повышения точности определения абсолютных высот точек местности по результатам измерений космических снимков с оптимальным углом фотограмметрической засечки. Указанная задача отрабатывалась для создания высотного обоснования топографических карт и фотограмметрического сгущения опорных геодезических сетей на больших площадях [11].

В целом можно говорить о том, что начиная с 1970-х гг. прошлого столетия, космическая фотосъемка земной поверхности была освоена в СССР и в США. Из военных и метеорологических космических систем выделился отдельный кластер ИСЗ, предназначенных для исследования природных ресурсов. Это особый род задач, для которых высокая детализация получаемых изображений не столь важна, как периодичность, большой пространственный охват и разнородность типов получаемых данных. В этой связи возникают и развиваются новые направления космических исследований и методов ДЗЗ, которые предполагают использование на борту ИСЗ оптико-электронных камер и сканеров, радиолокаторов, лидаров, СВЧ-радиометров, радиовысотометров [1, 2, 15].

Первый оперативный спутник ДЗ (т. е. спутник, передающий результаты ДЗ на Землю оперативно по радиоканалу) с оптико-электронной системой ДЗЗ, предназначенный для исследования природных ресурсов, был запущен в США еще в 1972 г. Это можно считать прорывным достижением. Спутник ERTS-1 (позже переименован в Landsat 1) исправно передавал по радиоканалу информацию (цифровые изображения), полученную при помощи многоспектрального сканера MSS. Был достигнут качественно новый уровень космических исследований Земли. ERTS-1 (Landsat 1) явился началом как для всей обширной космической программы США по исследованию природных ресурсов, так и для отдельной крайне эффективной миссии

спутников типа Landsat [1, 2, 16, 17]. К настоящему моменту на орбиту запущен уже восьмой спутник этой миссии — Landsat 8.

История развития отечественных методов космических исследований Земли, напротив, характеризуется замедленным переходом от фотографических систем к оптико-электронным. Задачи космической фотосъемки Земли, отработанные в СССР на пилотируемых космических аппаратах, постепенно переключались на автоматические беспилотные космические аппараты. Вначале это были спутники серии «Космос», а в дальнейшем – космические аппараты системы «Ресурс». Внедрение оперативных оптико-электронных систем происходило в замедленном по сравнению с США темпе. Тем не менее здесь следует отметить успех СССР в области космической радиолокации. С отечественных космических аппаратов «Космос-1870» и «Алмаз-1» при помощи радиолокаторов с синтезированной апертурой были получены высококачественные радиолокационные изображения земной поверхности, которые использовались в интересах обороны и экономики. Космическая радиолокационная программа прервалась в связи с тяжелой экономической ситуацией после распада СССР [1, 2, 7, 11].

Начиная с 1980-х гг. космические исследования Земли перестают быть приоритетом двух супердержав. Свои ИСЗ запускают европейские страны, Япония, Индия, Канада, Израиль и др. Появляются коммерческие программы ДЗЗ. Облик систем ДЗЗ начинает обретать современный вид.

Современные представления о дистанционном зондировании Земли

В современных системах дистанционного зондирования наиболее часто регистрируются электромагнитная энергия, излучаемая или отражаемая исследуемыми объектами, хотя могут измеряться и другие поля, характеризующие свойства этих объектов: напряженность магнитного поля, параметры гравитационного поля, интенсивность гамма-излучения [1, 2].

Дистанционные методы зондирования окружающей среды в зависимости от типов регистрируемых физических полей могут быть классифицированы [1, 2] на:

- методы, измеряющие характеристики электромагнитного поля;
- магнитометрические методы;
- гравиметрические методы;
- методы, основанные на регистрации потока частиц.

В свою очередь, методы, основанные на измерениях характеристик электромагнитного поля, подразделяются на пассивные, регистрирующие отраженное и рассеянное солнечное излучение или вторичное тепловое излучение объектов, и активные, регистрирующие отраженное и рассеянное излучение, создаваемое искусственными источниками [1, 2].

Данные дистанционного зондирования Земли используются для: проведения исследований в интересах наук о Земле (геология, геофизика, науки о гидросфере и атмосфере, география); исследования и рационального использования природных ресурсов; охраны окружающей среды; предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций

(природные катастрофы и техногенные аварии); метеорологии и климатологии; лесного и сельского хозяйства; градостроительства, транспорта, энергетики; создания карт, кадастров различных объектов, формирования геоинформационной продукции и др. [1, 2, 3, 5].

Наиболее наукоемкими являются космические исследования Земли, тогда как аэросъемка используется в основном для решения рутинных, хорошо отработанных задач, главной из которых является картографирование территорий в крупных масштабах [1, 2].

В настоящее время более 50 стран мира осуществляют изготовление космических аппаратов и их запуски, реализуя свой научно-технический потенциал. Более 150 стран пользуются результатами космической деятельности. При этом ДЗЗ является одним из наиболее важных направлений такой деятельности [6].

На сегодняшний день прослеживается тенденция перехода от дорогостоящих спутников-комбайнов, несущих большое количество аппаратуры, к комплексам («созвездиям») более легких спутников, оснащенных меньшим количеством приборов. Своеобразной визитной карточкой современного космического ДЗЗ является околоспутниковая (порядка 1 м) разрешающая способность на местности. При этом такие показатели достигнуты как для оптических, так и для радиолокационных спутниковых изображений [8]. Тем не менее область применения столь детальных изображений ограничена, поэтому данные среднего и низкого разрешения продолжают широко и эффективно использоваться. Именно в таких данных реализуются одни из основных преимуществ космической съемки – широкий обзор и эффект естественной генерализации [1, 2, 3].

Использование результатов космической деятельности в области ДЗЗ связано с применением высоких наукоемких технологий. Поэтому этот вид деятельности наиболее восприимчив к инновациям и требует внедрения самых последних достижений фундаментальной и прикладной науки. Бурный прогресс космических технологий в сочетании с развитием компьютерных технологий, методов математического моделирования, средств обработки информации, телекоммуникаций, электронной техники, методов управления базами данных, специализированного программного и геоинформационного обеспечения способствует тому, что за последнее 25-летие аэрокосмические исследования Земли обрели высокую эффективность. Характерной чертой ДЗЗ являются высокие темпы развития и быстрота получения практических экономических эффектов [3, 5]. Еще в СССР, по некоторым оценкам, учтенный экономический эффект от применения материалов космических съемок в виде прямой экономии, предотвращенных затрат или предотвращенного ущерба составил сотни миллиардов рублей [11].

В общем случае, для решения задачи обеспечения систематического обзора Земли из космоса на современном этапе развития необходимы следующие технологические составляющие [1, 2, 7]:

- 1) носители съемочной аппаратуры (ИСЗ);

- 2) аппаратура ДЗ;
- 3) бортовые средства передачи данных на Землю по радиоканалу;
- 4) наземные комплексы приема информации, ее обработки и предоставления потребителям.

Необходимо отметить, что характерной чертой современных аэрокосмических исследований Земли является критическая значимость методов и технологий обработки аэрокосмической информации. Именно разнообразие методов обработки позволяет получать различные значимые характеристики подстилающей поверхности даже в условиях ограниченного набора исходных данных. К выдающимся современным методам обработки данных ДЗЗ можно отнести метод дифференциальной интерферометрии, метод дистанционной пространственно-частотной спектрометрии, методы моделирования полей излучений на входе аппаратуры ДЗЗ, методы численного решения обратных задач ДЗЗ, радиолокационные поляризметрические методы и др. [1, 2, 3, 6, 14].

Современный этап развития средств дистанционного зондирования характеризуется широким использованием в качестве аппаратуры ДЗЗ оптико-электронных приборов и систем (ОЭС). Характерной особенностью таких устройств является осуществляемое в них преобразование оптического излучения, содержащего полезную информацию об объектах исследования, в электрический сигнал. Применение фотографических систем, в которых информация фиксируется на фотопленку и представляется в виде черно-белого, цветного или синтезированного (спектрального) изображения, практически прекращено. Однако в некоторых случаях их использование еще может быть оправданным, в частности при аэросъемке [1, 2, 3, 7, 10, 13].

К современным ОЭС, используемым в настоящее время для аэрокосмических исследований Земли, можно отнести панхроматические и многоспектральные камеры, сканирующие радиометры, спектрорадиометры, гиперспектрометры, лидары и другие приборы ДЗ. Применение в ОЭС различных приемников излучения, преобразующих оптический сигнал в электрический, позволяет работать в широком диапазоне спектра электромагнитных волн. Работа ОЭС происходит в автоматическом режиме, что определяет их высокое быстродействие и оперативность выдачи информации. Современные ОЭС представляют информацию в цифровом виде, предназначенном для обработки в ЭВМ, что, в свою очередь, позволяет осуществлять ее автоматическую или автоматизированную обработку. Структура ОЭС позволяет эффективно осуществлять фильтрацию сигнала, т. е. выделение полезной информации на фоне различных помех, в результате чего можно получить высокое пространственное и спектральное разрешение, высокую энергетическую чувствительность [1, 2, 3, 13].

Отдельно следует обратить внимание на современные радиолокаторы ДЗЗ. Они работают по принципу синтеза апертуры (радиолокаторы с синтезированием апертуры – РСА), что позволяет на несколько порядков улучшить их разрешающую способность. В частности, современные

космические РСА позволяют достичь околосветовой разрешающей способности на местности, обеспечивая такой же уровень детальности, как и космические оптические изображения. При этом радиолокационная съемка может осуществляться вне зависимости от погодных условий и времени суток, а современная группировка космических РСА позволяет осуществлять несколько съемок объекта в сутки в различных диапазонах длин волн [1, 2, 4, 8].

Важной чертой современного этапа развития аэрокосмических исследований Земли является нарастание интереса и осведомленности общественности по этой тематике. Этому во многом способствуют интернет-сервисы, на которых изображения ДЗЗ, полученные как с космических, так и с воздушных носителей, выложены для открытого просмотра. Примером наиболее развитого интернет-сервиса, базирующегося на результатах аэрокосмических съемок, является проект Google Earth (<http://www.google.com/earth>). Кроме того, данные, получаемые со спутников системы EOS (Earth Observation System – система наблюдений Земли), а также некоторые другие данные, имеющие высокую научную ценность, открыты для свободного использования, что способствует вовлечению широкого круга исследователей в процесс их обработки и анализа. Еще одним значимым фактором, обеспечивающим внедрение аэрокосмических методов и технологий исследования Земли в повседневную жизнь людей, является использование данных ДЗЗ в образовании. Опыт такой деятельности есть как в России, так и в других странах [1, 2, 16, 17].

В заключение отметим, что с момента возникновения аэрокосмических методов исследования Земли прошло уже более полутора веков. Все это время наблюдалась устойчивая тенденция к увеличению степени значимости данных, получаемых при помощи таких методов, а также расширение сферы их использования. Это в первую очередь обусловлено научным прогрессом и постоянным совершенствованием методов и технологий, применяемых при аэрокосмических исследованиях Земли, что в итоге обеспечило постоянное улучшение потребительских свойств аэрокосмических данных.

Создаются и эксплуатируются новые, все более совершенные космические системы пассивного и активного дистанционного зондирования, функционирующие как в оптическом, так и в радиодиапазонах спектра электромагнитных волн. Для решения определенного круга задач остается востребованной и продолжает использоваться аэросъемка. Наиболее эффективной аппаратурой ДЗЗ являются ОЭС различного типа, а также РСА.

Если в 1960-е гг. Советский Союз был единственной в мире страной, использующей ИСЗ для съемок Земли в интересах народного хозяйства, то теперь десятки стран мира осуществляют изготовление и запуски космических аппаратов такого назначения, реализуя свой научно-технический потенциал. Свои космические программы по исследованию Земли выполняют такие страны, как США, Франция, Германия, Италия, Япония, Индия, Канада и др., при этом приоритет России в этом направлении был утерян. Созданы

кооперации ряда стран по производству космической техники, ее использованию для исследования нашей планеты. Возрастает экономическая эффективность космической информации за счет использования прогрессивных технологий обработки и интерпретации спутниковых съемок.

В сложившихся условиях критическое значение имеют методы и технологии обработки аэрокосмической информации. Именно они позволяют на основании данных ДЗЗ получать итоговые информационные продукты для дальнейшего использования в различных приложениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондур В.Г. Модели полей излучения для систем дистанционного зондирования. Курс лекций. – М.: Московский государственный университет геодезии и картографии. – 2008. – 389 с.
2. Бондур В. Г. Основы аэрокосмического мониторинга окружающей среды. Курс лекций. – М.: Московский государственный университет геодезии и картографии. – 2008, – 369 с.
3. Бондур В. Г. Современные подходы к обработке гиперспектральных аэрокосмических изображений // Материалы научно-технической конференции «Гиперспектральные приборы и технологии». 17–18 января 2013. – Красногорск. – 2013. – С. 14–18.
4. Бондур В. Г. Космический радиолокационный мониторинг морских акваторий в районах добычи и транспортировки углеводородов / В. Г. Бондур, В. В. Замшин // – С. 257–273 в кн. «Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса» / под ред. Бондура В.Г. – М.: Научный мир. – 2012. – 692 с.
5. Бондур В. Г. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф / В. Г. Бондур, В. Ф. Крапи-вин, В. П. Савиных // – М: Научный мир. – 2009. – 692 с. – 22 цв. ил.
6. Бондур В. Г. О применении суперкомпьютеров для обработки потоков аэрокосмических изображений / В. Г. Бондур, А. А. Резнев // Материалы 2-й Всероссийской научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии», Дивноморское, Геленджик. – 2012. – С. 338–345
7. Гарбук С. В. Космические системы дистанционного зондирования Земли / С. В. Гарбук, В. Е. Гершензон // – М.: Издательство А и Б. – 1997. – 296 с.
8. Замшин В. В. Методы определения линейной разрешающей способности оптических и радиолокационных аэрокосмических изображений. // Известия ВУЗов. Геодезия и Аэрофотосъемка. – 2014. – №1. – С. 43–51.
9. История развития (приборы с зарядовой связью). – 2013. – <http://schools.keldysh.ru>
10. Кашкин В. Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений / В. Б. Кашкин, А. И. Сухинин // – М.: Логос. – 2001. – 246 с.
11. Киенко Ю. П. Основы космического природоведения: Учеб. для вузов. – М.: "Картгеоцентр-Геодезиздат". – 1999. – 285 с.
12. Матияевич Л. М. Аэрофоторазведка. Прошлое-настоящее-будущее // Исследование Земли из космоса. – №4. – 2012. – С. 78-84.
13. Савиных В. П. Оптико-электронные системы дистанционного зондирования: Учеб. для вузов / В. П. Савиных, В. А. Соломатин // – М.: Недра. – 1995. – 315 с.
14. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Том 9. Сборник научных статей. Под редакцией академика РАН Лаврова Н. П. – М.: ИКИ РАН. – 2012
15. Соломатин В. А. История науки. Учебное пособие. – М.: ПЕР СЭ. – 2003. – 352 с.
16. Шахраманьян М. А. Космические образовательные технологии: инвестиции в будущее (теория и практика) / М. А. Шахраманьян, И. И. Тюхов, Н. С. Вощенкова // – Калуга: Институт повышения квалификации работников образования. – 2009. – 776 с.
17. Estes J., Hemphill J. Some Important Dates in the Chronological History of Aerial Photography and Remote Sensing. UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SANTA BARBARA. Department of Geography. Rev. 2005 (by J. Hemphill)
18. The Remote Sensing Tutorial. Nicholas m. Short. USA. EOS-Goddard Program Office – 2005.

2.2. Роль экологического картографирования в науке и практике

Целью экологического картографирования является анализ экологической обстановки и ее динамики, т.е. выявление пространственной и временной изменчивости факторов природной среды, воздействующих на здоровье человека и состояние экосистем. Для достижения этой цели требуется выполнить сбор, анализ, оценку, интеграцию, территориальную интерпретацию и создать географически корректное картографическое представление весьма многообразной, нередко трудносопоставимой экологической информации.

Экологическое картографирование — наука о способах сбора, анализа и картографического представления информации о состоянии среды обитания человека и других биологических видов, т.е. об экологической обстановке.

Экологическое картографирование традиционно в наибольшей степени ориентировано на обеспечение государственных, региональных и местных программ и проектов природоохранной направленности. Между тем любая природоохранная деятельность осуществляется в рамках конкретных территорий. Поэтому планирование, реализация и контроль результатов природоохранных мероприятий требуют объективных данных об экологической обстановке и ее динамике в разных частях территории, что невозможно без использования картографической формы представления информации.

Экологическая информация крайне многообразна как по происхождению, так и по содержанию. Она поступает из официальных и неофициальных источников, добывается в результате исследования с использованием различных методов. К ней относятся материалы дистанционного зондирования, качественные и количественные характеристики загрязняющих веществ и статистические данные об объемах и условиях их поступления в окружающую среду, пространственная и временная динамика фактически измеренных уровней и состава загрязнения, данные о состоянии здоровья населения, растительном покрове и животном мире и многое другое. Часто единственным, что объединяет столь разнородные сведения, остается их принадлежность к определенной территории. Поэтому одним из событий начавшегося в 1960–1970-е годы современного этапа охраны окружающей среды стало развитие экологического картографирования как универсального метода анализа экологической информации.

При классификации источников информации по использованным научным методам и техническим приемам полезно различать первичные данные, специфика которых определяет возможности и области применения, и методы последующей обработки, в значительной мере относящиеся к общенаучным.

Дистанционные методы разрабатываются комплексом наук (физические, в том числе оптика, географические и биологические, в том числе ландшафтная индикация). Математико-статистические методы исследований опираются на характеристики источников загрязнения окружающей среды,

физико-химические методы на опробование природных объектов, медико-биологические — на наблюдения за состоянием биоиндикаторов.

Таким образом, в общей сложности может быть выделено четыре источника информации об экологической обстановке:

- дистанционное зондирование;
- характеристики источников и объемов техногенных нагрузок;
- экспедиционные и стационарные исследования состояния компонентов природной среды;
- состояние биоиндикаторов.

Наибольший эффект дает комплексное использование информации из всех названных источников. Комплексность исследования не равнозначна сумме информационных источников и должна обеспечиваться:

- разграничением функций информации из разных источников, исходя из их возможностей и особенностей;
- взаимопроверкой и сопоставлением данных;
- интеграцией материалов в обобщающие характеристики.

2.3 Дистанционное зондирование

Дистанционное зондирование природных объектов базируется на использовании электромагнитных излучений, исходящих от предмета исследования.

Дистанционные методы исследования подразделяются на пассивные, т.е. основанные на улавливании излучений от естественных источников (Солнца, Луны, звезд, земной поверхности и самих изучаемых объектов), и активные, т.е. предполагающие использование искусственных источников излучения (ламп накаливания, газоразрядных ламп, лазеров).

Наибольшее применение среди пассивных дистанционных методов получили исследования в оптической области электромагнитного спектра (фотографирование), в том числе в разных диапазонах. Получаемые фотографические материалы доступны для непосредственного зрительного восприятия и анализа с помощью всего арсенала средств, разработанных в рамках картографического метода исследования. Космические и аэрофотоснимки обеспечивают территориально полное и непрерывное изучение больших площадей, состояние которых зафиксировано на единый момент времени. Это наиболее эффективно при работах, связанных с проблемами охраны земельных, водных и растительных ресурсов (состояние лесов, пастбищ и пахотных угодий; эрозия; засоление; заболачивание).

Возможности изучения загрязнения с помощью космо- и аэрофотографических методов в целом скромнее и относятся в большей мере к территориальной, чем к количественной характеристике. В частности, имеется опыт картирования ореолов загрязнения снежного покрова вокруг городов, дымовых шлейфов различного происхождения, нефтяных пленок на морских поверхностях, запыленности городской атмосферы. Хотя в процессе загрязнения атмосферы городов участвуют не только твердые частицы, вследствие общности источников загрязнения, запыленность обнаруживает

удовлетворительную сходимость с расчетными значениями индекса загрязнения атмосферы (ИЗА). Осаждение взвешенных частиц из атмосферы формирует достаточно устойчивые зоны хронического загрязнения.

Загрязняемые площади располагаются в форме ореолов вокруг городов и в виде разнообразных полос вдоль всех дорог. В обычных условиях эти пятна невидимы и оконтурить их трудно. Благоприятные условия для их обнаружения складываются весной, когда загрязненные участки вскрываются снеготаянием и становятся видимыми на фоне чистых снегов. Съемки с искусственных спутников Земли в этот период делают ситуацию наглядной и обеспечивают картографирование как контуров зон влияния городов, промышленных предприятий, транспортных магистралей, так и различий в уровнях загрязнения внутри таких зон.

Спектральная яркость снежного покрова может быть количественно охарактеризована как с помощью оптических приборов, так и посредством компьютерных программ обработки изображений. Характеристики спектральной яркости могут быть проинтерпретированы в категориях качества окружающей среды путем сопоставления с данными наземных исследований о загрязнении атмосферного воздуха, почв, состоянии растительности, заболеваемости населения.

Возможности решения задач на основе космо- и аэрофотоснимков для разных территорий неравнозначны как вследствие неодинаковой обеспеченности соответствующими материалами (изза особенностей траекторий космических аппаратов и различий в повторяемости благоприятных для съемок условий), так и ввиду зависимости возможностей дешифрирования от комплекса физико-географических факторов (облачность, растительный покров). В силу указанных причин наибольшие успехи в изучении из космоса геологического строения, экзогенных процессов, состояния растительности относятся к семиаридной и аридной зонам. С другой стороны, дешифрирование снежного покрова, наиболее информативное в отношении характеристик загрязнения, возможно лишь при наличии устойчивого снежного покрова.

Высокая оперативность дистанционных методов, будучи неопределимым достоинством при решении задач мониторинга, превращается в недостаток, когда речь идет о картографировании осредненных за длительный период показателей. В литературе пока практически не затрагивается вопрос об условиях сопоставимости результатов повторных съемок, без чего невозможно, например, изучение закономерностей распространения дымовых и пылевых шлейфов в зависимости от метеорологических условий.

В отечественной и зарубежной литературе пока преобладает тенденция отождествления дистанционных и космоаэрофотографических методов исследования. Между тем более полное понимание дистанционных методов еще в 1983 г. сформулировали И. М. Назаров, А. И. Николаев и др.

Возможности дистанционного получения количественных характеристик загрязненности природных сред появились в связи с развитием

активных методов зондирования. Толчком к этому послужило создание лазерных источников излучения (лидаров). Индикаторами состава атмосферы, в том числе присутствия поллютантов, служат явления, возникающие при прохождении лазерного луча через газовую среду: поглощение, рассеяние, флуоресценция. Прибором анализируется вторичный сигнал от искусственных (зеркальных) или естественных отражателей, в том числе стен зданий, деревьев. Преимущества лидарных методов мониторинга воздушного бассейна связаны с их высокой оперативностью, возможностью непрерывного контроля. Однако в основе их лежат весьма тонкие физические эффекты, что делает лидары сложными в научном и конструктивном отношении устройствами.

Их широкое применение станет возможным лишь тогда, когда они из уникальных лабораторных приборов, эксплуатируемых научным персоналом, будут превращены в серийные, достаточно простые и надежные.

Лидарные методы быстро совершенствуются и в перспективе способны привести к революции в организации мониторинга воздушной среды. В то же время они едва ли в обозримой перспективе вытеснят традиционные методы вследствие сложности их аккредитации как методов количественного химического анализа, а также из-за недискретного (линейного) характера локализации получаемых величин. Кроме того, у лидарных методов и традиционных методов мониторинга разные условия наибольшей эффективности: первые применяются поверх застройки и вдоль магистралей; вторые — внутри застройки, где отсутствуют протяженные трассы для измерения.

Из других методов дистанционного зондирования, нашедших применение в экологическом картографировании, следует отметить гамма-спектрометрический. Его использование позволило перейти к сплошному картографированию радиационных полей.

2.4 Картографирование загрязнения вод суши

Общие закономерности загрязнения поверхностных вод суши

Загрязнение водных объектов, так же как и загрязнение атмосферы, сложный, многофакторный и весьма динамичный процесс. Концентрации различных загрязняющих веществ, присутствующих в водной среде, характеризуются сложной временной динамикой и зависят от:

- интенсивности поступления в водоемы;
- скорости процессов самоочищения и осаждения;
- объема водной массы, характера и скорости ее движения.

Каждый из перечисленных факторов загрязнения относительно независим от других и обладает собственной динамикой. Загрязняющие вещества поступают в водоемы со сточными водами от промышленных и сельскохозяйственных предприятий, коммунально-бытовой сферы, с поверхностным стоком за счет смыва с загрязненных территорий, при осаждении из атмосферы, от вторичных химических процессов трансформации поллютантов, от естественных источников.

Объемы сточных вод определяются ходом процессов их образования и накопления на предприятиях и в быту. Особенностью процессов загрязнения водных объектов является резкая изменчивость, связанная с возмолсностью залповых сбросов из емкостей-накопителей, как технологически обусловленных, так и аварийных. Смыв с загрязненных территорий таюке крайне неравномерен во времени и происходит при стоке дождевых и талых вод, а также во время паводков. Осаждение из атмосферы определяется присутствием в ней осаждающихся (вымывающихся) примесей и наличием соответствующих метеорологических условий.

Интенсивность процессов самоочищения зависит от состояния экосистемы водоема, температуры воды и скорости течения. Объемы воды в водных объектах зависят от комплекса гидрологических факторов и характеризуются внутри- и межгодовой изменчивостью. Поэтому уровни загрязнения водных объектов в разных регионах изменяются по сезонам неодинаково, в зависимости от гидрологического режима, а также характера загрязнения и его источников. Формирование сравнительно повышенных уровней загрязнения отмечается в следующих случаях:

- при относительно стабильном поступлении загрязнения и пониженном расходе воды, в условиях низкой летней или зимней межени; при массивном поступлении загрязнений (в том числе взвешенных частиц) с поверхностным стоком, во время весенних и дождевых паводков; при залповых сбросах, вне зависимости от состояния водоема.

В последнем случае последствия определяются как масштабами сброса, так и интенсивностью самоочищения. Известно, что последствия аварийных сбросов многократно усугубляются, когда их воздействию подвергаются холодные воды умеренного пояса зимой либо арктического и субарктического поясов в любой сезон.

Нормирование загрязнения гидросферы базируется на гигиеническом принципе. Предельно допустимые концентрации устанавливаются, исходя из минимальных возможностей вредных воздействий. Но вредные воздействия на человека или ихтиофауну достаточно часто бывают связаны не только с техногенными, но и с природными причинами. Едва ли не в любом геохимическом ландшафте имеет место дефицит одних элементов и избыток других.

С другой стороны, известно, что для водной среды ПДК тяжелых металлов установлены по валовым содержаниям, тогда как токсичны лишь свободные ионы. В результате по ряду веществ ПДК фактически установлены на уровне природного фона или даже ниже его, что искажает картину распределения уровней загрязнения и затрудняет использование интегральных показателей качества воды.

Картографирование самоочищения поверхностных вод может выполняться на качественном или количественном уровне исследования. Первое используется в мелко- и среднемасштабных, оценочных работах, выполняемых для больших территорий. Второе становится возможным при

крупномасштабных исследованиях, посвященных анализу конкретных ситуаций, прогнозированию последствий возможных и реальных случаев загрязнения.

Качественное картографирование условий самоочищения включает подразделение водных объектов на ряд категорий по параметрам, определяющим условия самоочищения: интенсивности перемешивания; температурам воды в летние месяцы; условиям разбавления загрязняющих веществ.

Интенсивность перемешивания воды в реках зависит от турбулентности потока, что, в свою очередь, контролируется характером рельефа и донных отложений. По этим условиям реки подразделяются на равнинные, предгорные (низкогорные) и горные; им соответствует слабая, средняя и сильная интенсивность перемешивания. По температурным характеристикам выделяется три категории рек со средними температурами в летнее время до 15, 15—20, выше 20 °С.

Сочетание характеристик перемешивания и температур позволяет выделить четыре категории условий самоочищения за счет трансформации загрязняющих веществ: благоприятные, относительно благоприятные, средние, неблагоприятные. Условия разбавления загрязняющих веществ определяются по среднегодовым расходам воды; по этому показателю реки подразделяются на шесть категорий. По сочетанию условий трансформации поллютантов и разбавления выделяется шесть градаций интегральных условий самоочищения: очень хорошие, хорошие, относительно хорошие, средние, плохие, очень плохие.

Для озер основной фактор перемешивания воды — ветровое волнение. Оно оценивается через показатель относительной мелководности, определяемый как отношение средней ширины или (для изометричных водоемов) квадратного корня из площади к средней глубине.

По сочетанию этого показателя и средних температур за летние месяцы выделяются те же четыре градации условий трансформации поллютантов, что и для рек. В качестве показателя условий разбавления загрязняющих веществ для озер используется их объем (шесть градаций).

По сочетанию условий трансформации и разбавления поллютантов для озер выделяются те же шесть градаций интегральных условий самоочищения: очень хорошие, хорошие, относительно хорошие, средние, плохие, очень плохие. Градации, выделяемые по указанным признакам, относятся к довольно крупным регионам, что позволяет решать задачи малкомасштабного картографирования.

Для передачи указанных характеристик самоочищения применяют линейные знаоии (для рек) и ареалы (для водоемов), с использованием на многокрасочных картах «принципа светофора»: оттенков зеленого, желтого и красного цветов, сменяющих друг друга а по мере ухудшения условий. На черно-белых картах используются штриховки, густота которых увеличивается по мере ухудшения условий.

Количественное картографирование самоочищения выполняется при крупномасштабных работах и базируется на прогнозе на основе известных зависимостей скоростей трансформации конкретных веществ от температуры среды.

При количественном картографировании предметом изображения являются не параметры самоочищения (их перевод из табличной формы в картографическую, с учетом температурных характеристик, возможен, но обычно нецелесообразен), а прогнозируемые результаты процессов самоочищения. Рассчитывается распространение веществ от мест их поступления в реку к определенным датам и ожидаемые концентрации по створам.

Наиболее эффективным средством решения такой задачи является математическое моделирование потоков загрязнений с визуализацией результатов методом графической мультипликации в виде карт-фильмов. Использование такой методики наиболее целесообразно при определении последствий реальных или возможных аварийных залповых сбросов, когда можно пренебречь поступлением аналогичных поллютантов от диффузных источников.

2.5 Анализ эколого-геохимических карт

На картах загрязнения почв, снежного покрова, донных отложений выделяются техногенные геохимические аномалии различного происхождения, территориального охвата, степени выраженности и опасности. Важнейшая задача анализа эколого-геохимических карт выявление причин образования аномалий, что служит предпосылкой целенаправленной, адресной разработки планов природоохранных мероприятий. Эта работа должна опираться на сбор и анализ имеющихся в природоохранных органах материалов о технологии производства на предприятиях, составе используемого сырья и отходов.

При анализе эколого-геохимических карт может применяться весь арсенал средств картографического метода исследования:

- визуальный;
- графический;
- картометрический;
- математико-статистический метод анализа;
- математическое моделирование;
- использование приемов теории информации.

Хорошие результаты дает сопоставление эколого-геохимических карт с геологическими, гидрогеологическими и тектоническими, геоморфологическими, микроклиматическими, геоботаническими, ландшафтными, а так же картами землепользования. При совместном использовании карт разной тематики определяют и сравнивают эколого-геохимические параметры (средние значения K и 4 , показатели изменчивости) для представленных на картах выделов различного характера. Их сопоставление между собой и с характеристиками, снимаемыми с

соответствующих карт, позволяет качественно и количественно оценивать роль различных факторов в формировании техногенных геохимических аномалий.

Наибольшим разнообразием происхождения отличаются педогеохимические аномалии. Среди них различают: аэрогенные (обусловленные осаждением пылегазовых выбросов), гидрогенные (сформированные загрязненными водами), агрогенные (образовавшиеся вследствие агротехнических воздействий) и вейслюгенные (связанные с твердыми отходами).

Для аэрогенных аномалий характерны следующие признаки: поверхностный характер, относительно значительные размеры, постепенность изменения элементного состава и концентраций. При этом максимумы концентраций могут отстоять от источника на расстояние до нескольких километров (от 10 до 40 высот в случае высоких источников горячих выбросов).

В составе аэрогенных аномалий обычно преобладают элементы, отражающие специфику производства на предприятии источнике загрязнения (легирующие добавки вблизи предприятий черной металлургии, профилирующие элементы вблизи предприятий по производству и переработке цветных металлов, ванадий и никель в зонах воздействия тепловых электростанций). На урбанизированных территориях, вне зависимости от производственной специализации, обычно наблюдаются *повышенные концентрации элементов, характерных для автотранспортного загрязнения и общераспространенных технофильных (свинец, цинк, медь, марганец).

Гидрогенные аномалии выделяются приуроченностью к поймам рек, днищам оврагов и балок. Для них обычно свойственно значительное участие элементов, характерных для стоков гальванических производств и очистных сооружений (серебро, никель, хром).

Агрогенные аномалии приурочиваются к сельскохозяйственным землям. Для них характерно присутствие фосфора и элементов примесей, содержащихся в апатитах и фосфоритах (фтор, стронций, иногда также мышьяк, свинец, цинк, редкоземельные).

Вейслюгенные аномалии отличаются резкими перепадами состава и концентраций. При их детальном изучении нередко удается выявить частицы — носители загрязнения.

Сопоставление карт загрязнения почв и снежного покрова позволяет выявлять характер динамики аномалий. Различают аномалии: реликтовые (выявляются по почвам, но не обнаруживаются по снегу), растущие (выявляются как по почвам, так и по снегу), формирующиеся (выражены в снегу, но отсутствуют в почвах).

Эколого-геохимические параметры многообразны, сложны и далеко не всегда поддаются однозначному объяснению. Анализ эколого-геохимических карт должен не усложнять, а упрощать понимание причин формирования территориальных различий в уровнях загрязненности, указывать на пути

решения существующих проблем. Показатель эффективности эколого-геохимического исследования – четкие и конкретные выводы о наличии (или отсутствии) и характере связи между загрязнением и определенными природными и техногенными факторами, с соответствующими практическими предложениями.